

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.05.035

浅层滑坡中的地下水作用机理及治理方法概述

黄细超,任光明,周纵横,姚晨辉,王云南,李源亮

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都 610059)

摘要:大量研究结论总结出降雨是边坡失稳最主要和最直接的原因,通过讨论浅层滑坡的地下水作用机理,概述了浅层滑坡治理方法,认为浅层滑坡的治理应多采用排水工程、加筋土挡墙和生态护坡等经济有效的治理措施手段,并指出当前浅层滑坡研究中存在的问题和发展趋势。

关键词:浅层滑坡;地下水作用机理;降雨;滑坡治理方法

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2016)05—0181—08

The Mechanism of Groundwater in the Shallow Landslide and the Governance Method

HUANG Xichao, REN Guangming, ZHOU Zongheng, YAO Chenhui, WANG Yunnan, LI Yuanliang

(The State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: A large number of research conclusions have been summarized that rainfall is the most important and direct reason of slope instability, through the mechanism of groundwater in the shallow landslide, this paper outlined the shallow landslide governance approach and concluded that shallow landslide's governance should use more economic and effective governance methods, such as drainage engineering, reinforced soil retaining wall and ecological slope protection method. Finally we pointed out that the current problems existing in the research of shallow landslide and its development trend.

Keywords: shallow landslide; the mechanism of groundwater; rainfall; landslide governance method

滑坡按滑动面深度可分为浅层滑坡($<6\text{ m}$)、中层滑坡($6\text{ m} \sim 20\text{ m}$)、厚层滑坡($20\text{ m} \sim 50\text{ m}$)、巨厚层滑坡($>50\text{ m}$)^[1],相对于其他类型的滑坡,浅层滑坡方量小,发生频率大,分布面积广,其在暴雨条件下极易诱发,是各领域最常见的边坡灾害类型^[2-5]。由于浅层滑坡多为松散堆积体,其特定的物质组成、结构性状及厚度条件决定了它特殊的亲雨性^[6],因此,降雨是浅层滑坡失稳最主要和最常见的诱发因素和环境因素^[2]。

浅层滑坡的失稳多与降雨有关,降雨诱发滑坡是人们的直观说法,但归根到底研究的还是地下水的作用。雨水渗入斜坡,既增加重度产生下滑力,又对滑带产生软化泥化作用,降低抗滑力,进而诱发滑坡的发生。事实上,研究滑坡的最终目的是为了治理滑坡,以减少滑坡对人类生命财产安全的威胁,因

而滑坡的研究应该和滑坡的治理研究结合起来。关于浅层滑坡的治理,人们常常采用一些诸如挡土墙、抗滑桩、预应力锚索等治理方法,虽然此类“以刚治柔”的方法见效快,但耗时耗力,既浪费土地又破坏生态环境,并非最佳治理方法。因此,针对浅层滑坡中的地下水作用展开治理方法的研究,对民生发展有着十分重要的现实意义。

1 浅层滑坡中的地下水作用机理

滑坡的变形失稳是一个极其复杂的过程,其影响因素可分为内在因素和外在因素两类。内在因素包括岩土体性质和岩土体结构,其变化十分缓慢,它们决定着滑坡变形的形式及规模;外在因素有水文地质条件、风化作用、地震以及人为因素,而这些因素的变化很快,常成为滑坡的诱发因素^[6]。对浅层

滑坡而言,其变形破坏一般受多种因素共同作用,而地下水作用是最直接和最重要的因素。浅层滑坡中的地下水作用主要包括水-岩相互作用和降雨作用。

1.1 水-岩相互作用

同大多数滑坡一样,浅层滑坡中的水-岩相互作用主要包括物理、化学和力学三类^[7-12]。其中,物理作用主要包括润滑作用、软化和泥化作用、冻融作用、水楔作用以及结合水的强化作用等;化学作用主要是指地下水与岩体之间的离子交换、溶解作用(岩溶)、水化作用(膨胀岩的膨胀)、水解作用、溶蚀作用、氧化还原作用等;力学作用主要表现在孔隙水压力作用(包括孔隙静水压力和孔隙动水压力作用)和溶蚀、潜蚀作用等。

国外关于水-岩相互作用的研究成果十分丰富,如:Frape S K 等^[13],Fritz P 等^[14]通过对比加拿大地区的浅层地下水和附近的海水,发现其化学成分极其相似,反映出共同的地球化学历史;White D E^[15]根据地下水的不同起源成因,将地下水分为雨水、大洋水、同生水、变质水、岩浆水及初生水等六类,从而从侧面解释了水-岩相互作用的关系和演变历程;Nordstrom D K 等^[16]通过对 Stripa 地区 1232 m 处的花岗岩进行采样分析,发现其地下水成分包括两种类型:一种是典型的 Ca-HCO 类型地下水,一种是从 Ca-HCO 类型过渡而来的 Na-Ca-Cl 类型地下水,其化学作用包括方解石、萤石和重晶石等的水解;Tóth J^[17]从整个地质科学的角度出发,将地下水与环境的相互作用包括三大类,即化学相互作用(溶解、水合、水解、氧化-还原、酸性腐蚀、化学沉淀、离子交换、硫酸盐还原、溶解固体的浓集及与弱透水层水力越流相伴的超渗透),物理相互作用(润滑作用及对孔隙水压力的控制)和动力相互作用(水、液相、非液相物质及热量的传输)。

从上述结果可以看出,国外在研究水-岩相互作用时,大多集中在理论研究方面。我国学者在这方面的研究多与地质灾害相结合,进而发展了水-岩相互作用的研究范围,如:王士天等^[18]开展了大型水域水-岩相互作用及其环境效应研究,其研究成果表明,在水利水电建设、特别是大型水库的建设和营运过程中,由水-岩相互作用产生的地质灾害作用不仅强度很高,而且时空尺度也较大;仵彦卿^[19]在总结地下水对边坡稳定性的影响时,将水-岩相互作用概括为力学作用、物理作用、化学作用三类,其中力学作用有静水压力和动水压力作用,物理

作用包括软化、泥化、润滑作用及结合水的强化作用,化学作用主要有离子的交换、水化、水溶以及氧化还原作用;徐则民等^[20]则认为水下岩相互作用不仅是滑坡事件的主要激发因素,它在斜坡演化即滑坡孕育过程中也发挥着极其重要作用。

纵观国内外学者的研究成果,可以发现专项研究浅层滑坡中水-岩相互作用的成果较少,人们大多直接讨论边坡中的水-岩相互作用及其影响,虽然这也概括出了一些浅层滑坡中的水-岩相互作用,不过难免有所不足。因而,这方面的研究缺陷对浅层滑坡的治理也造成了一定的困难。

1.2 降雨作用

浅层滑坡中的降雨作用主要体现在降雨对滑坡稳定性的影响,目前的研究多从降雨强度、降雨持续时间、降雨入渗量和降雨入渗深度等方面入手^[21]。部分国外学者认为由于浅层滑坡的深长比较小,应将其作为无限平面滑动型滑坡来研究^[22-25],而我国学者陈善雄等^[26]认为降雨引起的浅层滑坡,将潜在滑动面模拟为折线型较为合适,采用极限平衡的稳定性分析方法,创立了一种充分考虑地下水入渗非饱和土质边坡的稳定性分析方法。

在国外诸多学者关于浅层滑坡降雨作用的研究中,大多以降雨条件和入渗模型的研究为主,如: Au S W C^[27]对香港 1982 年—1989 年发生的 24 个因暴雨引发的边坡失稳案例进行了统计分析,他认为降雨强度和分布范围是影响降雨型边坡失稳破坏及规模大小的主要因素;Cho Sungeun 等^[28]通过对 Pradel-Raad 模型的修正,提出一种模糊计算方法来估算降雨型匀质浅层滑坡稳定性;Calvella M 等^[29]通过监测雨量数据、测压管水位数据以及倾斜仪数据,综合分析这些数据之后得出了滑坡滑动位移速率和降雨量之间的经验关系;Muntohar Agussetyo 等^[30]通过改进 Green-Ampt 模型并结合无限边坡的概念提出了考虑降雨作用的计算模型来分析浅层滑坡的雨水入渗。

我国大部分学者对降雨诱发浅层滑坡的研究也是多参考国外学者的研究思路,但研究的内容更具体,常与工程实践紧密结合,如:王治兵等^[31]在室内模拟人工降雨条件下,进行雨强与地形对雨水入渗的试验研究,通过控制单一变量进行试验,利用坡面产流所需时间和孔压两项指标揭示出:产流历时与斜坡坡度、雨强呈反比,与雨强呈指数函数关系,从而得出坡面泥石流及浅层滑坡的发生与雨水的渗透密切相关,雨水的渗透由斜坡坡度、雨强、土体性质

等因素控制;唐晓松等^[32]通过对比分析渗流计算和经验概化这两种浸润面位置的计算方法对涉水边坡稳定性分析结果的影响,发现按经验概化法所确定的稳态浸润面位置进行稳定性分析,其结果将偏于危险,且误差在10%以上;张国超等^[33]认为降雨是一个随时间变化的函数,那么对边坡稳定性的评价也应是一个长期的过程,并采用GeoStudio中的SLOPE/W和SEEP/W模块对宝兴县某滑坡三次不同降雨条件下的稳定性进行评价,讨论了间歇性降雨情形下长期评价边坡稳定性的思路和方法;罗渝等^[34]选取四种具有代表性的降雨类型(均匀型、递增型、递减型以及峰值型)为研究对象,讨论了不同降雨类型对浅层滑坡地下水位变化的影响,研究结果表明:降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响较明显,其影响程度由高到低依次是递增型降雨、均匀型降雨、峰值型降雨和递减型降雨。

从上述国内外学者的研究情况来看,短期低强度的降雨对整个浅层滑坡稳定性影响非常有限,当降雨持续时间和强度达到一定程度时,则可导致浅层滑坡失稳。事实上,降雨对浅层滑坡的影响是综合性的,一方面是渗入坡体中的地下水的影响;另一方面则表现为对坡面的冲刷和对坡脚的掏蚀。因

此,针对降雨对浅层滑坡稳定性的影响设计治理方案是浅层滑坡治理工程中首先要讨论的课题。

2 浅层滑坡的治理方法概述

由于浅层滑坡具有分布范围广,影响因素多的特点,其发生具有反复性和承继性,多发生于工程建筑区和农林耕种区,对人们的生命财产有着直接威胁,并且易在降雨作用下形成泥石流,扩大灾害影响范围^[5],因而浅层滑坡的治理十分棘手,很难真正意义上达到根治的目的。对浅层滑坡的治理,传统方法常采用削坡减载、排水工程、坡脚挡土墙支护、坡顶截水、坡面拱形骨架防护等综合整治方案^[35-39]。虽然此类方法的初期治理效果明显,能使边坡稳定,但在过一段时间后,钢筋混凝土逐步老化锈蚀,导致治理工程的强度降低,防治效果下降^[35-36],同时在治理过程中产生大量的挖方和弃土,造成建设用地增加和水土流失,进而生态环境破坏,导致防治成本增加。特别是在一些偏远山区,使用“刚性”的治理方案,导致原来的耕地林地受损,完全不符合民生发展需求。目前常用的浅层滑坡治理方案见表1^[40-45]。

表1 浅层滑坡主要治理方法

治理方法	主要用途
清除滑坡体	对于一些小型的土质浅层滑坡,当其无继续扩展的可能性且挖方量较小时,可采用挖除的方法,永久消除危害。
清方减重	对于推移式浅层滑坡,在滑坡体上部(下滑区)清方减重,可减少下滑推力。
加载反压	对于牵引式浅层滑坡,在坡体前缘修建片石垛或堆载体加载反压,增加抗滑体的重量使滑坡稳定。
减重反压法	对于推移式滑坡且滑动面不深时,可采用坡顶挖方、坡脚填方的治理方案。
土质改良法	主要方法有电渗法、焙烧法、爆破法、动力固结法、化学加固法等,常作为辅助治理方法,常用的是注浆加固,包括石灰黏土浆和水泥-水玻璃灌浆。
灌浆勾缝	对于较坚硬的、不易风化的、节理裂缝多而细的岩质浅层滑坡,可采用灌浆勾缝的方法加固边坡岩体。
抹面防护	对于未严重风化的各种岩质边坡,当对边坡坡度不作限制时,可在其表面抹护50 mm左右的水泥砂浆,并且严格封闭护坡抹面和未防护坡面的接口。
混凝土护坡	对于易风化但未严重风化的岩质边坡,可采用喷射混凝土或锚杆挂网喷浆。
干砌片石护坡	对于易受表面水冲刷土质路堤边坡和常产生小型溜坍的边坡,可采用干砌片石护坡。
浆砌片石护坡	对于易风化的岩质边坡和土质边坡,可根据边坡高度及坡度适当采用浆砌片石护坡。
浆砌片石骨架护坡和浆砌片石护墙	对于风化严重的土质边坡或岩质边坡,当坡面受到严重的雨水冲刷时,可采用浆砌片石骨架护坡或浆砌片石护墙。
排水工程	对于受地下水或降雨影响严重的边坡,必须修建排水措施进行地表排水和地下排水。常用的地表排水措施有滑坡体外环形水沟、滑坡体内树枝状或人字形排水沟、支撑渗沟等;地下排水措施有渗沟、泄水隧洞等。
抗滑明洞	对于由人工开挖引起的工程滑坡,可在滑坡前缘临空区采用抗滑明洞,并且在明洞顶部回填挖方土。
抗滑挡土墙	对浅层滑坡可采用重力式抗滑挡墙整治,为增加墙身抗剪力,可将基底作成倒坡或加凸榫;另外也可选用锚定板挡墙、加筋挡土墙、预应力锚索(杆)挡墙等新型挡墙。
格构锚固	对于大多数滑坡,可采用坡面防护与锚固相结合的格构锚固综合治理技术。
生态护坡	对于坡度不大的浅层土质滑坡,应优先考虑植物护坡;对于不适合植被生长的浅层岩质滑坡,应根据地质情况和地形条件综合考虑植被护坡与工程护坡的结合治理方案。

从表 1 可以看出,目前对浅层滑坡的治理可以概括为两种防护系统:刚性防护系统和柔性防护系统^[46]。前者以浆砌片石或喷混凝土护坡、锚固和重力式挡土墙等最为常见,而后者则以生态护坡为主。针对目前浅层滑坡的治理研究现状,结合到浅层滑坡中的地下水问题,建议对中小型浅层滑坡采用以下几种符合当前发展需求的治理方法。

2.1 排水工程

俗话说“治坡先治水”,排水工程在滑坡的治理中应用较早,但没有得到应有的重视,在大多数情况下,排水工程只作为滑坡稳定性计算中的预留保守估计,并没有纳入实际的稳定计算中^[47]。国外关于排水工程的专项研究较少,一般多集中在治理措施建议上,如:Seward 等^[48]根据俄勒冈州雨林大多数泥石流和浅层滑坡的发生情况,指出修建排水系统可以明显减少此类地质灾害发生的概率;Kritikos T 等^[49]利用 GIS 对瑞士阿尔卑斯山区的泥石流和浅层滑坡的解译结果,建议对区域内的地质灾害体建立地下水排水系统进行治理。我国在边坡排水工程的研究上大多集中在排水工程的布置和排水系统的模型研究等方面,如:刘德富等^[50]从坡面产流及降雨入渗的一般规律分析入手,对滑坡地表排水在不同产流阶段以及不同条件下的效果进行了探讨,提出了地表排水工程的布置原则;陈洪凯等^[51]基于对边坡中地下水的存在性及作用机理的分析,建立了排水微分控制方程,并利用敏感性分析求解法得到了岩体中地下水的优化排水方向;殷坤龙等^[52]认为降雨型滑坡的治理措施应优先考虑地表水防渗和地下排水方案,同时考虑位移、降雨量以及地下水动态的结合;俞伯汀等^[53]通过有限元方法对浙江省某滑坡的深部和浅部滑面进行数值模拟分析,认为该滑坡治理中应以排水工程作为核心措施。

我国有许多著名的大型滑坡治理工程都采用了排水工程,并起到了十分显著的效果。比如:长江三峡黄蜡石滑坡充分利用天然冲沟、公路路堑沟和应急排水沟,组成地表排水沟网,大大提高了该滑坡的稳定性^[54];三峡库区的大板石滑坡在治理时,设置了地表排水系统和地下排水系统,最后监测结果表明排水系统对提高滑坡稳定性效果十分明显^[55];宣汉县天台乡特大型滑坡在应急治理过程中,结合滑坡的地形地貌特征在坡体上设置了一系列地表排水和地下排水工程,并辅以抗滑桩工程,使得该滑坡得到了迅速有效的治理^[56]。

可以看出,由于大多数浅层滑坡受地下水影响

较严重,排水工程在滑坡的治理中是不可忽视的一个重要手段。对于降雨型浅层滑坡,在大多数情况下宜优先考虑排水工程,并在滑坡防治总体方案基础上,结合水文地质和工程地质条件,确定地表排水和地下排水方案。同时,排水工程应从流体力学的角度来计算滑坡的稳定性,而不只是作为滑坡稳定性计算的安全储备,从而减少其他治理工程的经济费用。

2.2 加筋土挡墙

加筋土挡墙作为一种由加筋构件与填土交错铺设而成的一种复合柔性结构物,具有过滤、排水、隔离、防渗作用、防护和减压等功能,且节约占地,造型美观,造价低廉,具有良好的经济效益,目前已广泛用于地基、路堤、高陡边坡等领域^[57-59]。关于加筋土挡墙的研究,自加筋土技术提出以来就一直在不断发展,目前多集中在加筋土的应力分布方式和破坏形式上,如:Zornberg J G 等^[60]基于极限平衡法,结合离心机模拟和数字图像分析了加筋土挡墙在不同加筋条件下的应力分布情况;Juran I 等^[61]对法国里尔市某桥肩的加筋土挡墙进行了全尺寸的试验研究,得到了加筋土挡墙的力学破坏模式;Khaniki A K 等^[62]采用三轴试验获得了相同条件下加筋土和无筋土的极限承载力强度,分析了加筋土增大内摩擦力的方式。

在我国,许多学者也对加筋土挡墙有着较为深入的研究,如:杨果林等^[63]在进行矸石山滑坡治理过程中,针对煤矸石对筋材的腐蚀作用及矸石填料的特点,设计出了一种用煤矸石混凝土包裹钢筋的钢筋煤矸石混凝土网格加筋土挡墙;杨广庆等^[64]通过现场观测一座多级台阶式高路堤加筋土挡墙,研究了各级墙的侧向位移、基底应力及墙背土压力的分布规律;李广信等^[65]在计算填料为黏性土的加筋挡土墙时,发现在其中可能会产生超静孔隙水压力,并且超静孔压的存在使其土压力的大小及分布、潜在滑裂面的位置都有所改变。

考虑到目前浅层滑坡在治理工程中常采用的重力式挡土墙耗时耗力且不经济的特点,建议在中小规模浅层滑坡的治理中可以适当使用加筋土挡墙。一方面,加筋土挡墙具有重力式挡土墙几乎所有的特点,能够在边坡坡脚起到很好的阻滑作用;另一方面,加筋土挡墙还具有增大土地使用面积、变形不失稳以及抗震性能较好等优点,尤其是在我国西部耕地较少地区,使用加筋土挡墙可以很好的和民生工程结合起来,达到治理和发展的目的。

2.3 生态护坡

生态护坡定义是指用活的植物(单独用植物或者植物与土木工程和非生命的植物材料相结合)以减轻坡面的不稳定性和侵蚀,因而植被护坡的目的是利用植被进行坡面保护和侵蚀控制^[66]。同传统治理方法相比,植被护坡在发挥其护坡功能的同时,还能够迅速恢复因人类工程活动所破坏的生态环境,同时植被护坡还具有工程造价低的优点。因此,在强调生态环境保护、人与自然和谐相处的今天,生态护坡正逐步成为国内外常用的浅层滑坡治理技术^[67-70]。

生态护坡技术的研究和应用在国外有着很长的历史,如:1936年,美国在南加利福尼亚州的 Angeles Crest 公路边坡治理中应用生态护坡技术,对开挖边坡种植较长根系的植被,既固定了浅层滑坡,又达到了绿化环境的目的^[71];Patric J H 等^[72]在美国阿拉斯加东南部林区调查发现砍伐过的坡体发生滑坡的概率和范围显著增大,他们认为滑坡发生的主要原因是树根的破坏和腐烂;Beek L P H V 等^[73]在研究生态工程学植被护坡的稳定性时发现,当潜在的不稳定土体完全被植物根系穿过时,边坡稳定性显著增强,另外根系增强稳定性的作用只在土体表面起作用,不同的植被所产生的稳定性效果不同。日本的植被护坡研究伴随着其公路建设,目前已有多项植被护坡专利技术,如:Kobayashi T^[74]研制出一种纤维水泥土壤,像硬化剂一样喷射在斜坡表面,干硬后平行于地平线,可保护植物的正常生长;Matsumoto Koichi^[75]利用植被网研制了一种网格较小三维网络用于坡面防护,该三维植被网络可以很好的与建筑物相结合,并且具有良好的形状保留属性,可以低成本制造。

我国学者对生态护坡的研究多集中在根-土相互作用方面。如:杨永红等^[76-77]研究了植被类型和含水率对非饱和土抗剪强度的影响,同时还研究了根系的最大抗拉强度和抗拉拔强度;黄金^[78]利用植被含水固土的原理,将边坡上的覆盖土视为根-土复合材料,草根视为带预应力的三维加筋材料,探讨了香根草防护浅层滑坡的可行性;程洪等^[79]根据植物的力学护坡作用进行了力学机制方面的探讨,提出四个层次的植物根系网固土力学机制模式,并对不同草本植物根系的固土性能进行了力学试验比较,结果表明不同植物根系具有不同的抗拉强度;黄圣瑞等^[80]通过研究认为根系可以分为垂直根和侧根,起锚固作用的是垂直根,起加筋作用是侧根。

可以看出,植被护坡在浅层滑坡的治理中具有很好的应用前景,一方面植被的根系深入到坡体内可以对坡体起着很好的加筋作用,从而达到稳定坡体的目的;另一方面植被护坡还可以防治坡面冲刷,美化自然环境,恢复自然生态系统。因此,对于降雨型浅层滑坡的治理可以考虑生态护坡,构建自然和谐生态环境。

3 浅层滑坡研究中存在的问题及发展趋势

3.1 存在的问题

通过前文的讨论与概述,总结出浅层滑坡研究中当前存在以下几点问题:

(1) 稳定性计算问题。通常,在边坡极限平衡稳定性分析中一般都考虑了静水压力,但对于动水压力往往忽略不计。对浅层滑坡而言,由于其稳定性受地下水作用明显,因而动水压力更容易在浅层滑坡的稳定性计算中引起较大的误差。

另外,当前边坡稳定性分析一般都局限在二维剖面的稳定性计算中,而这种计算方式存在其固有的局限性,不能完全代表边坡整体稳定性。尤其是对浅层滑坡而言,其稳定性影响因素敏感性较强,导致二维剖面的稳定性计算更具有局限性。

(2) 生态护坡研究中存在的问题。随着人们环保意识的提高,关于浅层滑坡的治理,其人文环境要求进一步提高,越来越多的柔性支护系统将受到重视,而生态护坡作为柔性护坡系统中的翘楚,应受到更多的关注。但是,在目前生态护坡的研究中还存在许多问题。

首先,生态护坡的治理措施并没有参与到浅层滑坡的稳定性计算当中,仅仅作为一个稳定性的安全储备;其次,在探讨植被对边坡的影响作用时,一般只探讨草木植物的护坡作用,忽略了微生物和有机物对边坡稳定性的影响;还有就是,在深层滑坡的防治方面,生态护坡存在的缺陷性并没有得到有效克服。另外,目前的生态护坡工程大多只注意边坡的生态恢复,过分强调植被护坡的绿化美观效果,往往忽视了植被的固土护坡功能。

(3) 学科技术交叉融合问题。在研究浅层滑坡与降雨和地下水的关系时,目前多局限于单一学科或技术的研究,很少实现交叉学科的贯通性研究,而降雨或地下水的研究又涉及到多个学科,并且很多学科都属于其所在学科的研究前缘问题,或是学科的核心问题所在。

3.2 发展趋势

针对当前浅层滑坡研究中存在的问题,指出今后浅层滑坡研究的发展趋势:

(1) 稳定性计算的发展趋势。针对浅层滑坡中的动水压力问题,今后应加强研究浅层滑坡中动水压力对浅层滑坡稳定性的影响,应将流体力学和水动力学引入到边坡的稳定计算中。

针对浅层滑坡中二维剖面稳定性计算的局限性,今后其稳定性的研究应逐步向三维或四维层次发展,不再局限于讨论滑坡的静态稳定性分析,而应更多的讨论边坡的动态活动性分析,对于浅层滑坡的稳定性分析更应该实现实时活动性的动态分析。

(2) 生态护坡研究的发展趋势。针对生态护坡治理措施只是作为边坡稳定性安全储备的问题,今后应加强根-土相互作用机理、根-土相互作用力学模型、根系-复合体相互作用以及根系生长特性等方面的研究,同时还应加强研究微生物和有机物对边坡稳定性的影响。

另外,在实际工程应用中,应该综合考虑植被与边坡土体之间的相互作用关系,充分了解有关植物护坡的机理;同时,浅层滑坡的生态护坡应紧密结合农学、林学和生态学,筛选出适合不同边坡的优势植物品种,开展组合应用研究,使护坡植被群落具有稳定性和自我适应性。

(3) 学科技术交叉融合的发展趋势。在今后的研究中应逐步实现跨学科、跨专业的横向合作,进行系统的分析研究,比如土壤学、地质学、植物学、气象学、化学、物理学、数学以及信息科学等;同时,将地下水数值模拟软件与现代高新技术(如 3S 技术、神经网络技术及雷达探测技术等)相结合,进一步提高浅层滑坡稳定性分析的决策效率和应用水平;另外,利用现代理论(如尖点突变理论、系统理论、混沌理论等)对浅层滑坡与降雨的关系进行精确有效的观测与研究,并在此基础上提出经济有效的治理方案。

参考文献:

[1] 刘广润,晏鄂川,练操.论滑坡分类[J].工程地质学报,2002,10(4):339-342.

[2] 常金源,包含,伍法权,等.降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨[J].岩土力学,2015,36(4):321-326.

[3] 李宁,许建聪,钦亚洲.降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究[J].岩土力学,2012,33(5):235-240.

[4] 许建聪,尚岳全,陈侃福,等.强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18):3246-3251.

[5] 赵森,黄磊.秭归县三分田滑坡成因分析及稳定性评价[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):113-117.

[6] 王发读.浅层堆积物滑坡特征及其与降雨的关系初探[J].水文地质工程地质,1995(1):20-23.

[7] 周平根.滑坡中地下水与岩土体相互作用机理的研究[J].地学前缘,1996(1):34-34.

[8] 张作辰.滑坡地下水作用研究与防治工程实践[J].工程地质学报,1996,4(4):80-85.

[9] 丰定祥,吴家秀,葛修润.边坡稳定性分析中几个问题的探讨[J].岩土工程学报,1990,12(3):1-9.

[10] 沈照理,王焰新.水-岩相互作用研究的回顾与展望[J].地球科学:中国地质大学学报,2002,27(2):127-133.

[11] 韩勇.三峡库区某滑坡成灾降雨过程的确定[J].水利与建筑工程学报,2012,10(1):168-172.

[12] Brantley S L, Conrad C F, Kubicki J D. Kinetics of Water-Rock Interaction[J]. Springer Verlag, 2008, 56(4):1-37.

[13] Frapce S K, Fritz P, Mcnutt R H. Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the Canadian Shield[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1984, 48(8):1617-1627.

[14] Fritz P, Frapce S K, Drimmie R J, et al. Reply to comments by Grabczak et al. on "Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the Canadian Shield"[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1986, 50(7):1561-1563.

[15] White D E. Subsurface waters of different origins[C]//Extended Abstracts of Fifth International Symposium on Water-rock Interaction. Reykjavik: Orkustofnun, 1986:629-632.

[16] Nordstrom D K, Ball J W, Donahoe R J, et al. Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1989, 53(8):1727-1740.

[17] Tóth J. Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations [J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(7):1-14.

[18] 王士天,刘汉超,张倬元,等.大型水域水岩相互作用及其环境效应研究[J].地质灾害与环境,1997,8(1):69-88.

[19] 仵彦卿.地下水与地质灾害[J].地下空间与工程学报,1999,19(4):303-310.

[20] 徐则民,黄润秋,范柱国.滑坡灾害孕育-激发过程中的水-岩相互作用[J].自然灾害学报,2005,14(1):1-9.

[21] 杨文东.降雨型滑坡特征及其稳定分析研究[D].武汉:武汉理工大学,2006:78-79.

[22] Skempton A W, Delory F A. Stability of natural slopes in London clay [C]//Proceedings of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [s. l.]:

- [s.n],1957:378-381.
- [23] Pradel D, Raad G. Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 119(2):315-332.
- [24] Sung E C, Seung R L. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128:756-763.
- [25] Mein R G, Larson C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. *Water Resources Research*, 1973, 9(2):384-394.
- [26] 陈善雄,陈守义.考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J].*岩土力学*,2001,22(4):447-450.
- [27] Au S W C. Rainfall and slope failure in Hong Kong[J]. *Engineering Geology*, 1993, 36(1/2):141-147.
- [28] Cho Sungeun, Lee Seungrae. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes consideration rainfall characteristics [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(9):756-763.
- [29] Calvello M, Cascini L, Sorbino G. A numerical procedure for predicting rainfall-induced movements of active landslides along pre-existing slip surfaces[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2007, 32(4):327-351.
- [30] Muntonar Agussetyo, Liao Huang Jin. Rainfall infiltration: infinite slope model for landslides triggering by rainstorm [J]. *Natural Hazards*, 2010, 54(3):967-984.
- [31] 王治兵,余斌,朱云波,等.雨强与地形(上缓下陡)对坡面入渗影响的初步研究[J].*科学技术与工程*, 2015, 15(2):314-317.
- [32] 唐晓松,郑颖人,林成功.浸润面位置的确定方法对涉水边坡稳定性分析的影响[J].*岩石力学与工程学报*, 2008, 27(S1):2814-2819.
- [33] 张国超,范付松,赵鑫.间歇性降雨对滑坡稳定性的影响[J].*安全与环境工程*,2011,18(4):1-6.
- [34] 罗渝,何思明,何尽川.降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响[J].*地球科学:中国地质大学学报*,2014, 39(9):1357-1363.
- [35] Lee IY. A review of vegetative slope stabilization[J]. *Hong Kong Inst of Engineer*, 1985, 13(7):9-12.
- [36] Hammasuna J, Maki H. Method of vegetation in slope protection area; JP960222255, 960823, Patent No: JP10060900[P]. 1988-03-03.
- [37] 杨永兵,施斌,杨卫东,等.边坡治理中的植物固坡法[J].*水文地质工程地质*,2002,29(1):64-67.
- [38] 周德培,张俊云.植被护坡工程技术[M].北京:人民交通出版社,2003:4-5,62-63.
- [39] 贾逸,王佃明,冯志峰,等.金阳县野猪湾1#滑坡稳定性分析及治理措施[J].*水利与建筑工程学报*,2015, 13(6):172-177.
- [40] 张倬元.滑坡防治工程的现状与发展展望[J].*地质灾害与环境保护*,2000,11(2):89-97.
- [41] 林鲁生,刘祖德.滑坡治理的发展概况以及加固方案的选择[J].*广东水利水电*,2001(2):3-5.
- [42] 文育高,李家财.滑坡治理方法及其应用[J].*西部探矿工程*,2010,22(5):19-21.
- [43] 耿高飞.柔性支护在渐进式浅层滑坡中的应用[J].*水运工程*,2014(2):197-199.
- [44] Gray D H. Influence of vegetation on the stability of slopes [C]//Barker D H. *Vegetation and Slope stabilization, Protection and Ecology*. London: Thomas Telford, 1995:2-25.
- [45] Nordin A R. Bioengineering to ecoengineering, Part 1: the many name [J]. *International Group of Bioengineers Newsletter*, 1993(3):15-18.
- [46] Wang L, Shi P, Tian H, et al. Stability analysis and charts for borrowed soil in ecological slope engineering[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2016:1-12.
- [47] Schmid P, Luthin J. The drainage of sloping lands[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(8):1525-1529.
- [48] Seward, John H. Forest management and effects on shallow, rapid landslide-initiated debris flows in Oregon [J]. *Cordilleran Section - 98th Annual Meeting Corvallis, Oregon*, 2002:1255-1259.
- [49] Kritikos T, Davies T. Assessment of rainfall-generated shallow landslide/debris-flow susceptibility and run out using a GIS-based approach: application to western Southern Alps of New Zealand[J]. *Landslides*, 2014, 12(6):1-25.
- [50] 刘德富,罗先启.滑坡地表排水布置及效果初探[J].*葛洲坝水电工程学院学报*,1994,16(2):24-31.
- [51] 陈洪凯,翁其能.边坡岩体中地下水优化排水机理研究[J].*地质灾害与环境保护*,2000,11(2):112-115.
- [52] 殷坤龙,汪洋,唐仲华.降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J].*地质科技情报*,2002,21(1):75-78.
- [53] 俞伯汀,孙红月,尚岳全,等.浙江下山滑坡特征及稳定性分析[J].*岩石力学与工程学报*,2006, 25(Z1):2875-2881.
- [54] 陈国金,张陵.黄膜石滑坡地下排水效果分析[J].*中国地质灾害与防治学报*,1998,9(4):53-60.
- [55] 徐卫亚,高德军,郭其达,等.三峡库区大石板滑坡区排水系统效果评估[J].*工程地质学报*,2002, 10(1):83-88.
- [56] 范宣梅,许强,黄润秋,等.四川宣汉天台特大滑坡的成因机理及排水工程措施研究[J].*成都理工大学学报:自然科学版*,2006,33(5):448-454.
- [57] 杨果林.现代加筋土技术应用与研究进展[J].*力学与实践*,2002,24(1):9-17.
- [58] Schlosser F, Elias V. Friction in Reinforced Earth [C]// *Symposium on Earth Reinforcement*, ASCE, 2010:327-336.
- [59] Laba J T, Kennedy J B. Reinforced earth retaining wall analysis and design [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 23(23):317-326.

- [60] Zornberg J G, Arriaga F. Strain Distribution within Geosynthetic-Reinforced Slopes [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(1):32-45.
- [61] Juran I, Schlosser F, Long N T, et al. Full Scale Experiment on a Reinforced Earth Bridge Abutment in Lille [C]// Symposium on Earth Reinforcement, ASCE, 2011:556-584.
- [62] Khaniki A K, Daliri F. Analytical and experimental approaches to obtain the ultimate strength of reinforced earth elements[J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2013, 17(5):1001-1007.
- [63] 杨果林,王永和. 钢筋(煤矸石)混凝土网格式加筋土挡土结构强度特性与试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(5):534-539.
- [64] 杨广庆,蔡英,苏谦. 高路堤加筋土挡土墙变形和受力研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(2):321-326.
- [65] 李广信,陈平,介玉新,等. 加筋挡土墙在二维超静孔压下的稳定分析[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(3):103-106.
- [66] Ministry of Works and Transport (Nepal). Use of Bioengineering in the Road Sector (Geo environmental unit) [S]. [s.l]:[s.n], 1999:509-518.
- [67] Romano N, Lignola G P, Brigante M, et al. Residual life and degradation assessment of wood elements used in soil bioengineering structures for slope protection[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 90:498-509.
- [68] Kokutse N K, Temgoua A G T, Kavazovic Z. Slope stability and vegetation: Conceptual and numerical investigation of mechanical effects[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 86:146-153.
- [69] 张俊云,周德培,李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. *水土保持通报*, 2000, 20(4):36-38.
- [70] 王金惠,杨知建. 护坡植物的选择及对护坡土体稳定性的影响研究进展[J]. *作物研究*, 2011, 25(1):84-88.
- [71] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical stabilization of highway cut slope[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118(9):1395-1409.
- [72] Patric J H, Douglass J E, Hewlett J D. Soil water absorption by mountain and piedmont forests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1965, 29(3):303-308.
- [73] Beek L P H V, Bogaard T A, Asch T W J V. Assessing the relative importance of root reinforcement and hydrology with respect to slope stabilisation by eco-engineering[J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2004, 6:5225.
- [74] Kobayashi T. Slope protection method for planting: US, US 4304069 A [P]. 1981.
- [75] Matsumoto Koichi. Net of three-dimensional construction and vegetation method for surface of slope: WO9635021 [P]. 1996.
- [76] 杨永红,刘淑珍,王成华. 土壤含水量和植被对浅层滑坡土体抗剪强度的影响[J]. *灾害学*, 2006, 21(2):50-54.
- [77] 杨永红,刘淑珍,王成华,等. 浅层滑坡生物治理中的乔木根系抗拉实验研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(1):138-140.
- [78] 黄金. 香根草生物工程技术在浅层滑坡治理中的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2010:45-46.
- [79] 程洪,颜传盛,李建庆,等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1):62-65.
- [80] 黄圣瑞,郑建荣,袁安华. 根系含量对边坡稳定影响分析[J]. *工程建设与设计*, 2009(6):97-100.

(上接第 99 页)

- [6] 董云,楼梦麟. 基于结构基频确定 Rayleigh 阻尼系数的优化方法及其讨论[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(2):8-13.
- [7] 王田友,丁洁民,楼梦麟. 关于轨道交通所致建筑振动的计算方法和阻尼矩阵的讨论[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(11):77-79.
- [8] 楼梦麟,邵新刚. 应用通用程序计算深覆盖土层地震反应的几个问题[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(4):63-68.
- [9] 楼梦麟,董云. 加速度反应谱规范化对场地位移时程的影响[J]. *震灾防御技术*, 2014, 9(2):149-158.
- [10] 张建成,贾金青,何慧荣. 两跨三层型钢超高强混凝土框架抗震性能试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2015, 13(6):1-7.
- [11] 楼梦麟,隋磊,沈飞. 不同阻尼矩阵建模对超高层结构地震反应分析的影响[J]. *结构工程师*, 2013, 29(1):55-61.
- [12] 潘旦光. 地震反应分析中 Rayleigh 阻尼系数的优化解[J]. *工程力学*, 2013, 30(11):15-20.
- [13] 楼梦麟,张喜. 竖向地震下双塔楼结构的行波地震反应分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2012, 29(1):94-100.
- [14] 朱伟庆,贾金青. 型钢超高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(4):57-67.
- [15] 贾金青,朱伟庆,余芳,等. 型钢超高强混凝土柱截面曲率延性研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(1):42-51.